



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2026-1

С.А. Горохов, В.Ф. Головкин, В.И. Иньшаков,
М.К. Полковников, В.В. Скворцов, Г.В. Фонин

**Плоскопараллельная двухкоординатная
ионизационная камера**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2026

Аннотация

Горохов С.А. и др. Плоскопараллельная двухкоординатная ионизационная камера: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 2026-1. - Протвино, 2026. – 16 с., 14 рис., 2 табл., библиогр.: 3.

В работе описана конструкция и характеристики двухкоординатной полосковой ионизационной камеры, разработанной для экспериментального клинического комплекса ионной лучевой терапии ускорителя У-70 НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Описаны процедуры калибровки чувствительных элементов (стрипов) для измерения профилей пучков ионов углерода. Приведены результаты испытания камеры на пучках ионов углерода.

Abstract

Gorokhov S.A. et al. Plane-parallel dual coordinate ionization chamber: NRC «Kurchatov Institute» - IHEP Preprint 2026-1. – Protvino, 2026. – p. 16, fig. 14, tables 2, refs.: 3.

Article describes basic construction elements and parameters of the plane-parallel dual coordinate ionization chamber (PPIC), which is to be used as a part of experimental clinical complex of ion radiotherapy at the U-70 accelerator of the Institute of High Energy Physics Kurchatov Center. This manuscript describes PPIC design, acquisition system, calibration procedures of sensitive elements of PPIC that compensate intensity profiles. The experimental results for PPIC exposition in ion beams are presented.

Введение

Двухкоординатная полосковая газовая камера используется в установках лучевой терапии для измерения пространственного положения первичного пучка, размера и степени однородности плоского поля при формировании дозовых объёмов пучком адронов с использованием вобблер магнитов. Для любой лучевой установки с пучками адронов, трасса оси пучка имеет принципиальное значение, т.к. точность позиционирования пациента на пучке и корректность последующего облучения напрямую зависят от направления оси пучка в лабораторной системе координат и в теле пациента. Из-за меньшего рассеяния пучка ионов углерода в ионизационной камере, по сравнению с пучками протонов или электронов, измерение пространственных профилей интенсивности пучка с использованием плоских многоканальных ионизационных камер, с пространственным шагом чувствительного элемента 1 мм, позволяет определить пространственное положение центра пучка с точностью $\sim 0,3$ мм.

Система сбора данных с полосковых газовых детекторов создана на базе ПЛИС Altera MAXII с контроллером ATmega128, вычитывающим данные с полосковых детекторов в последовательном режиме чтения информации и буферизующим данные во время вывода пучка из ускорителя. По концу вывода, данные, накопленные в буфере памяти контроллера, передаются по каналу USB в PC и обрабатываются.

В статье приведены результаты разработки двухкоординатной полосковой газовой камеры для экспериментального Центра ионной лучевой терапии [1,2]. Описана конструкция камеры и электроники съёма и обработки информации. Приведены процедуры выравнивания чувствительности каналов регистрации с использованием генератора сигналов и рентгеновского источника. Приведены экспериментальные результаты измерения профилей пучка ионов углерода на этапе создания канала транспортировки пучка.

Конструкция камеры

Конструктивная схема двухкоординатной полосковой камеры приведена на рисунке 1. Медные стрипы (полоски) толщиной 18 мкм сигнальных электродов нанесены на тонкую полиимидную основу толщиной 50 мкм (2 и 6 на рисунке 1) и плакированы золотом для защиты от окисления. Топология каждой плоскости электродов выполнена таким образом, чтобы на каждую плоскость приходится 192 стрипа шириной 300 мкм каждый, разделенные зазором шириной 700 мкм, четные номера стрипов выводятся на одну сторону (влево или

вниз в зависимости от ориентации плоскости электрода), а нечетные номера стрипов - в противоположную сторону (вправо или вверх). Каждый стрип представляет собой анод ионизационной камеры. Катод (4 на рисунке 1) изготовлен из полиимидной пленки толщиной 50 мкм, покрытой медью толщиной 18 мкм с обеих сторон. Величина воздушного зазора между плоскостью катода и плоскостью анодов определяется стеклотекстолитовыми рамками 3 и 5 и составляет 2 мм. Рабочий объем заполнен воздухом. Electroды плакированы золотом для исключения их окисления.

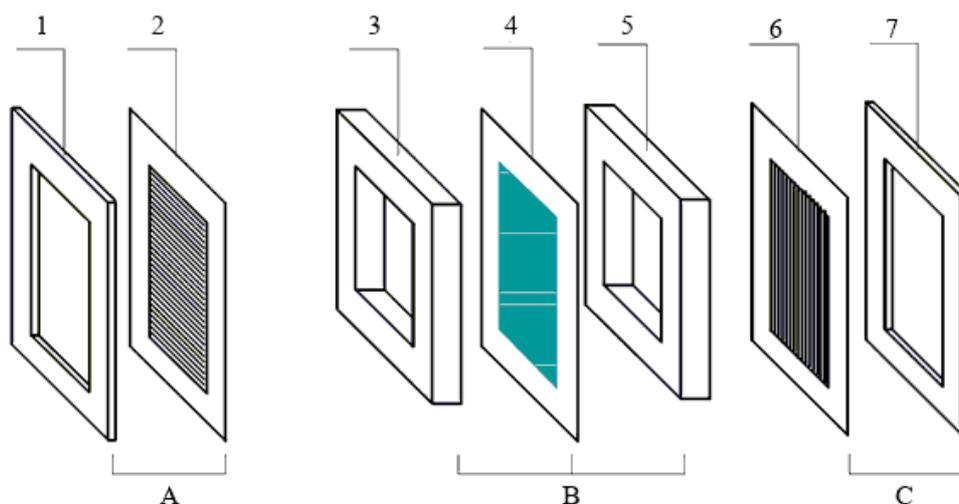


Рис. 1. Геометрия плоскостей анодов и катода: 1 и 7 - стеклотекстолитовая охранная рамка толщиной 1.2 мм; 2 и 6 - сигнальные электроды; 3 и 5 - стеклотекстолитовые рамки 2 мм для газового объема; 4 - высоковольтные электроды.

Площадь активной зоны камеры по пучку составляет $19.2 \times 19.2 \text{ см}^2$. Топология электродов сформирована с использованием стандартной технологии печатных плат (PCB).

Приведённые выше толщины материалов, пересекаемые пучком, были выбраны с целью минимизации потерь энергии ионами углерода. Так, например, их общая толщина эквивалентна толщине воды 480 мкм для кинетической энергии ионов углерода 200 МэВ/нуклон и 600 мкм - для энергии ионов 410 МэВ/нуклон. Напряжение питания камеры (24В) подключается к электроду 4 (см. рисунки 1 и 2).

С использованием программы FLUKA4-5.0 для рабочего воздушного газового промежутка $d=2 \text{ мм}$ при нормальных условиях были рассчитаны средние потери энергии ионами углерода. Которые составили для энергии ионов 450 МэВ/нуклон $\Delta E = 17.88 \text{ кэВ}$, а для 200 МэВ/нуклон $\Delta E = 28.66 \text{ кэВ}$.

Принимая интегральную интенсивность пучка 10^9 ионов можно оценить средний заряд в камере по формуле 1.

$$Q_E = \frac{(\Delta E \cdot I \cdot e)}{w} \quad (1),$$

где:

ΔE — среднее энерговыделение [эВ];

I — интенсивность [частиц ионов углерода];

e — заряд электрона в [$1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл];

w — энергия образования пары электрон-ион в воздухе [34.5 эВ].

Средний заряд в камере для пучка ионов углерода равен:

Для энергии $E_{кин} = 200$ МэВ/аеи: $Q_{200} = 132.9$ нКл;

Для энергии $E_{кин} = 450$ МэВ/аеи: $Q_{450} = 82.9$ нКл.

Принимая за размер пучка диаметр пучка ± 3 сигмы определим средний заряд в одном канале шириной 1 мм в максимуме распределения для пучка диаметром 20, 30, 40, 50, 100 мм (таблица 1).

В случае нормального распределения частиц $N(0,1)$ в пучке высота максимума равна

$$f_{max} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}}$$
 для центрального стрипа.

Таблица 1. Средний заряд в центральном стрипе в зависимости от энергии и размера пучка.

Диаметр пучка, мм	20	30	40	50	100
Сигма пучка, мм	3.33	5	6.66	10	16.67
Макс. количество частиц на стрип $f_{max}, \%$	11.87	7.95	5.97	4.78	2.39
Средний заряд на стрип $Q_{max},$ нКл (E = 200 МэВ/нуклон)	15.77	10.56	7.93	6.35	3.17
Средний заряд на стрип $Q_{max},$ нКл (E = 450 МэВ/нуклон)	9.84	6.59	4.95	3.96	1.98

Считывание и сбор данных

Структурная схема электроники считывания, разработанная для полосковой камеры, приведена на рисунке 2.

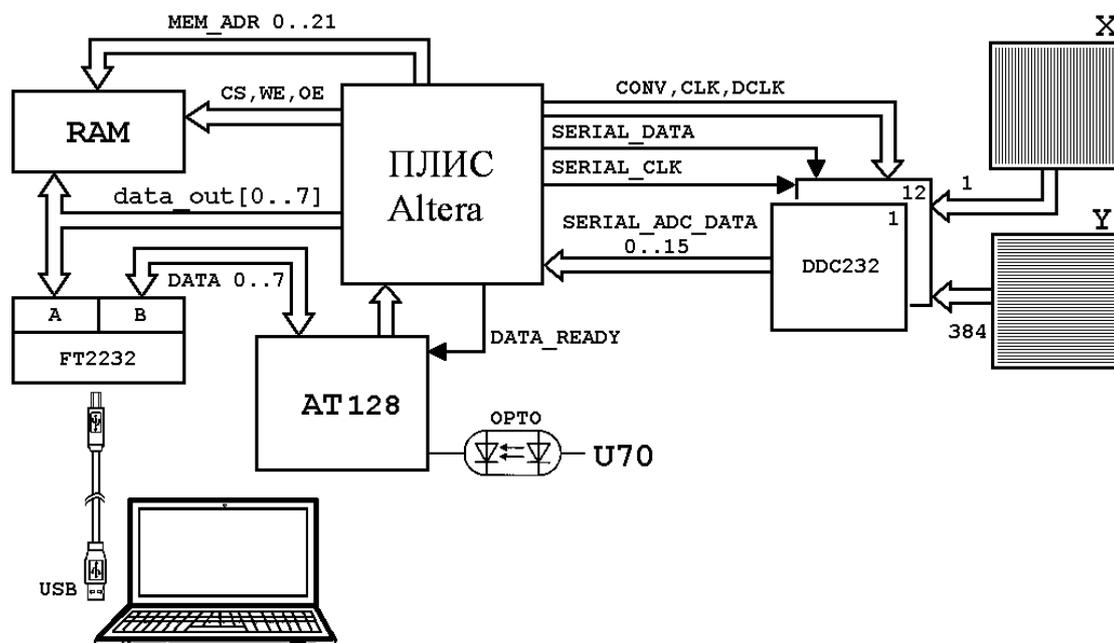


Рис. 2. Структурная схема камеры и электроники считывания.

В структурную схему входят:

- две сигнальные плоскости камеры X и Y;
- интегрирующие усилители со встроенными АЦП DDC232 (12 штук);
- промежуточная память RAM;
- программируемая логическая интегральная схема EPM570 (на схеме Altera) для выработки рабочего протокола чипов DDC232 и обслуживания RAM ;
- контроллер ATmega128 (на схеме AT128) с интерфейсными модулями связи FT2232;
- оптрон для связи с U70 (на схеме ОПТО);
- компьютер верхнего уровня (PC).

Электроника системы сбора данных содержит 12 плат интегрирующих усилителей DDC232. К каждой плате подключено по 32 стрипа сигнальных электродов. Микросхемы

интегрируют ионизационные токи камеры и преобразуют их в цифровые коды с использованием встроенных АЦП.

Для работы с камерой используется усилитель DDC232. DDC232 представляет собой 16(20)-ти разрядный 32-х канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с токовым входом. Схема подключения камеры к усилителю (на примере одного канала) показана на рисунке 3.

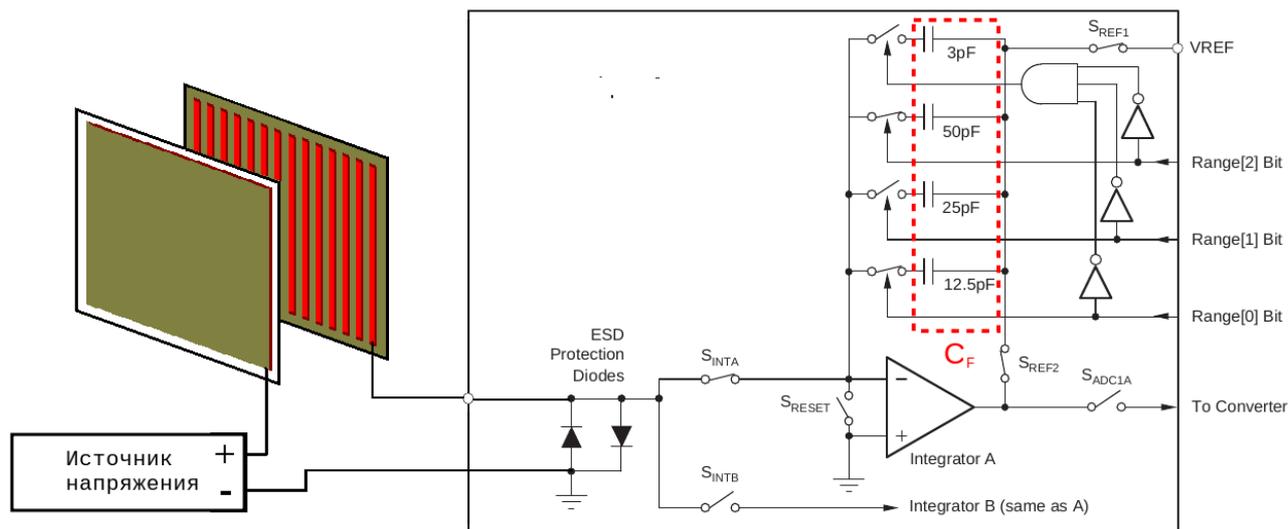


Рис. 3. Схема подключения камеры к усилителю.

Каждый канал усилителя содержит в себе два интегратора (на рисунке 1 Integrator A, Integrator B). Такая конструкция позволяет осуществлять непрерывную интеграцию тока: пока один интегратор оцифровывается встроенным аналого-цифровым преобразователем, другой интегрирует входной ток. Для каждого канала имеется восемь различных комбинаций емкостей для обоих интеграторов. Выбор режима работы чипа производится записью управляющих кодов в регистр конфигурации (**Configuration Register**). В таблице 2 указано значение емкости конденсатора для каждого диапазона.

Таблица 2. Значения емкости интегрирования в зависимости от RANGE0-RANGE2

RANGE2	RANGE1	RANGE0	Емкость C_f , пФ	Входной диапазон, пКл
0	0	0	3	От -0.048 до 12.5
0	0	1	12.5	От -0.2 до 50
0	1	0	25	От -0.4 до 100

0	1	1	37.5	От -0.6 до 150
1	0	0	50	От -0.8 до 200
1	0	1	62.5	От -0.1 до 250
1	1	0	75	От -1.2 до 300
1	1	1	87.5	От -1.4 до 350

По завершении аналого-цифрового преобразования заряд на интегрирующей емкости C_f сбрасывается с помощью S_{REF1} и S_{RESET} ($RESET = S_{RESET}$, S_{REF1} замкнуты, переключатели $S_{A/D}$, S_{INTA} , S_{REF2} разомкнуты). Таким образом, конденсатор C_f заряжается до опорного напряжения V_{REF} . Как только интегрирующий конденсатор заряжен, переключатели S_{REF1} и S_{RESET} отключают опорное напряжение V_{REF} от усилителя, схема переходит в режим ожидания начала интегрирования ($WAIT =$ ключи $S_{A/D}$, S_{RESET} , S_{REF1} , S_{INTA} разомкнуты, ключи S_{REF2} замкнуты). Передний фронт сигнала $CONV$ (см. рисунок 3) отпирает ключ S_{INTA} и начинает интегрирование входного сигнала интегратора *Integrator A*. Заряд от входного сигнала разряжает конденсатор C_f , в результате чего выходное напряжение усилителя снижается ($Integrate =$ ключи S_{RESET} , S_{REF1} , $S_{A/D}$ разомкнуты, ключи S_{INTA} , S_{REF2} замкнуты). Спад сигнала $CONV$ останавливает интегрирование путем переключения входного сигнала с интегратора *Integrator A* на интегратор *Integrator B* ($Convert =$ ключи S_{RESET} , S_{REF1} , S_{INTA} разомкнуты, ключи $S_{A/D}$, S_{REF2} замкнуты).

Для нормальной работы микросхемы необходимо, чтобы ток из неё вытекал, т.е. чтобы на сигнальных контактах камеры собирались ионы. Это определяет рабочую полярность напряжения питания камеры. Для того чтобы проинтегрировать максимальный заряд $Q_{max} = 15.77$ нКл (таблица 1) усилителем, имеющим максимальный входной диапазон 350 пКл, необходимо разбить длительность сброса ускорителя (900 мс) на $15.77/0.35 \approx 45.05$ частей. Таким образом, время интегрирования не должно превышать 20мс.

Чипы DDC232 включены в режиме непрерывного интегрирования (*Continuous Mode*). Подробно с режимами работы чипа можно ознакомиться в [3] на страницах 16-19. Для работы в этом режиме чипу DDC232 требуется три управляющих сигнала:

1. сигнал **CLK** - главный строб сигнал DDC232 появляется сразу после включения питания и равен 16,384МГц ;

2. сигнал **CONV** — служит для переключения между каналами интеграторов чипа DDC232. Время интегрирования чипа равно длительности сигнала **CONV**. В нашем случае

длительность сигнала **CONV** можно менять в диапазоне 1-16 мс, в зависимости от кода, записанного в регистр конфигурации.

3. сигнал **DCLK** - строб сигнала чтения данных DDC232. Это может быть 512 или 640 импульсов для чтения данных чипа в зависимости от формата данных.

После записи регистров конфигурации, ПЛИС Altera выдаёт управляющие сигналы для чипа. Чтение данных из чипа начинается через 500мкс после любого фронта сигнала **CONV** (состояние вывода **DVALID** игнорируется). Данные всех 12-ти чипов считываются в ПЛИС Altera в свой индивидуальный 16-ти разрядный сдвиговый регистр. При этом записи данных во внешнюю память не происходит. После получения следующего сигнала **CONV** данные сдвиговых регистров перезаписываются. Строб импульс КЦУ (конец цикла ускорения и начало вывода) от U70 разрешает запись данных чипов во внешнюю память RAM. 16-ти разрядное слово сдвигового регистра пишется во внешнюю память в два приема младший байт, старший байт. Еще два байта занимает информация о номере чипа и номере канала внутри чипа. Запись во внешнюю память продолжается либо до полного заполнения памяти, либо до получения команды от контроллера AT128. При полном заполнении памяти запись в память блокируется, вырабатывается сигнал запроса на чтение данных, ПЛИС ALTERA переходит в режим ожидания чтения данных.

При получении команды чтения, ПЛИС Altera отключается от шины данных, переключает память RAM в режим чтения, далее строб импульсами перебирает нужное количество ячеек памяти. Данные памяти читаются в компьютер (PC) при помощи микросхемы FT2232 по каналу "А". Микросхема FT2232, производства компании FTDI, представляет собой преобразователь USB-интерфейса в параллельный FIFO-интерфейс с возможностью конфигурирования в различные стандартные последовательные или параллельные интерфейсы. В нашем случае микросхема сконфигурирована в режиме 245 FIFO. Параметры конфигурации сохраняются во внешней микросхеме EEPROM 93C46.

Калибровка чувствительности стрипов

Для каждого стрипа производится двухэтапная калибровка: выравнивание электронного тракта (счётной характеристики) по опорному току и выравнивание чувствительности к ионизирующему излучению.

1. Выравнивание счетной характеристики — когда на вход каждого интегрирующего АЦП подается уровень тока разной величины. При этом оцифровывается сигнал на всем диапазоне рабочих амплитуд АЦП.
2. Выравнивание чувствительности каналов регистрации к ионизирующему излучению — на камеру подается равномерный по интенсивности поток квантов от источника рентгеновского излучения. Амплитуды всех стрипов нормируются на амплитуду опорного стрипа.

Типовой график счетной характеристики в 16-разрядном режиме показан на рисунке 4. Время интегрирования — 4 мс, номинал интегрирующей емкости — 25 пФ.

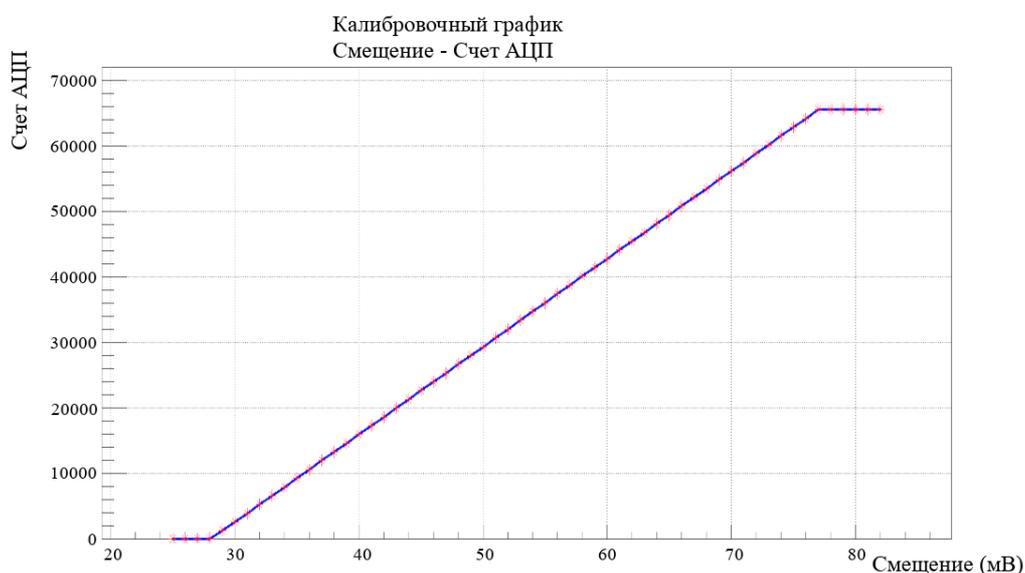


Рис. 4. Калибровочная характеристика одного канала 16-разрядного АЦП камеры.

Численной характеристикой является тангенс угла наклона на участке линейного роста. Расчет калиброванного значения с учетом счетной характеристики осуществляется по формуле

$$ADC_{v_{кан}} = ADC_{кан} \cdot \frac{tg_{опор}}{tg_{кан}}, \quad (2)$$

где:

$ADC_{кан}$ — амплитуда канала до калибровки;

$tg_{опор}$ — тангенс угла наклона опорного канала;

$tg_{кан}$ — тангенс угла наклона канала для калибровки;

$ADC_{v_{кан}}$ — амплитуда канала после калибровки.

Выравнивание чувствительности каналов регистрации выполняется после выравнивание счетных характеристик всех стрипов. При этом на фронтальную поверхность камеры подается равномерный изотропный поток рентгеновского излучения: фокусное расстояние — 1 м, анодное напряжение — 60 кВ, анодный ток — 25 мА, время экспозиции — 0.4 с. В качестве источника рентгеновского излучения используется рентгеновский излучатель DONGMUN DIG360.

Для каждого канала стрипа вычисляется средний уровень сигнала, относительно пьедестала по формуле 3.

$$P_{\text{кан}} = \sum_{i=1}^{i=M} \frac{\text{ADC}v_i}{M}$$

$$S_{\text{кан}} = \sum_{j=1}^{j=K} \frac{\text{ADC}v_j}{K} - P_{\text{кан}}, \quad (3)$$

$$S'_{\text{кан}} = \frac{S_{\text{кан}} \cdot Su_{\text{опор}}}{Su_{\text{кан}}}$$

где:

$\text{ADC}v_i$ и $\text{ADC}v_j$ — значение счета АЦП выбранного канала в выборке пьедестала и сигнала от рентгеновского излучения;

M — количество элементов в выборке пьедесталов канала после калибровки;

$P_{\text{кан}}$ — средний счет пьедестала в выборке амплитуды канала после калибровки по формуле (3);

K — количество элементов в выборке сигнала амплитуды канала;

$S_{\text{кан}}$ — средний счет сигнала в выборке амплитуды канала после калибровки по формуле (3);

$Su_{\text{опор}}$ — средний сигнал опорного канала стрипа, полученный при равномерном изотропном потоке рентгеновского излучения;

$Su_{\text{опор}}$ — средний сигнал канала стрипа, который необходимо выравнивать, полученный при равномерном изотропном потоке рентгеновского излучения;

$S'_{\text{кан}}$ — средний счет сигнала в выборке амплитуды канала после калибровки и выравнивания чувствительности.

Полученное значение $S'_{\text{кан}}$ используется для построения профиля амплитуды напрямую либо переводится в заряд (пКл) в соответствии со значением из таблицы 2 в зависимости от номинала интегрирующей емкости.

Схематично процесс выборки подмножеств значений для расчета среднего уровня пьедестального распределения и уровня сигнала представлен на рисунке 5.

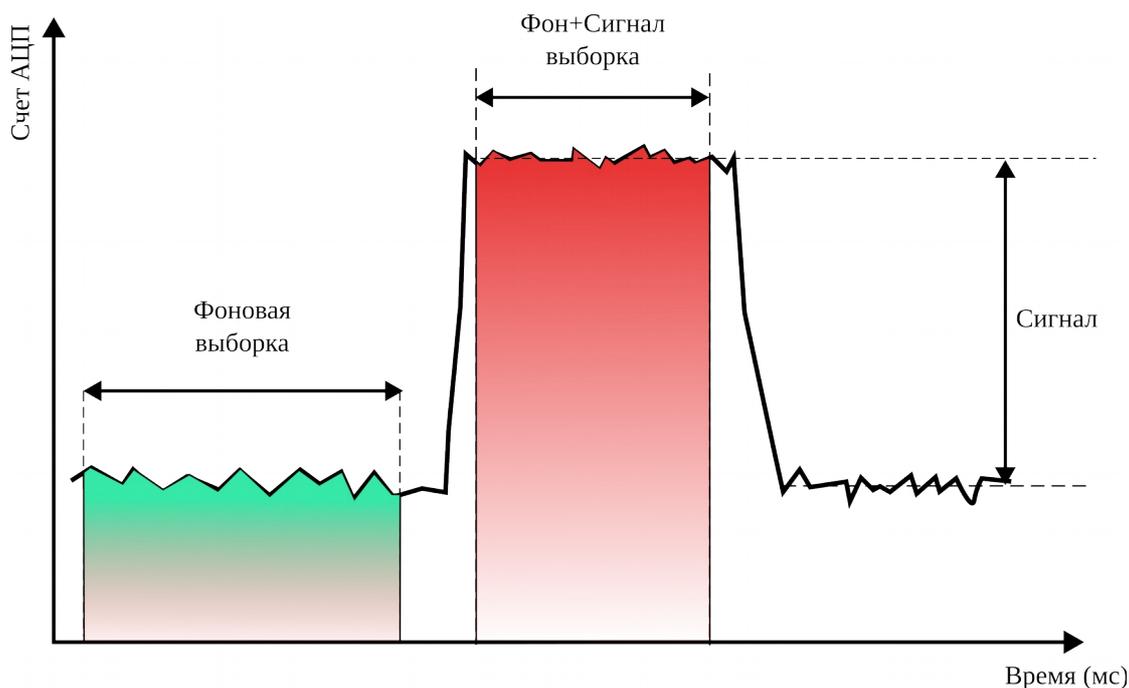


Рис. 5. Схема выбора значений для среднего уровня пьедестала (фоновая выборка) и среднего уровня пьедестал+сигнал (фон+сигнал выборка), для выделения уровня полезного сигнала.

Пример профиля пучка ионов углерода до применения выравнивания чувствительности каналов (формула 3), и после применения этой процедуры приведен на рисунках 6 и 7.

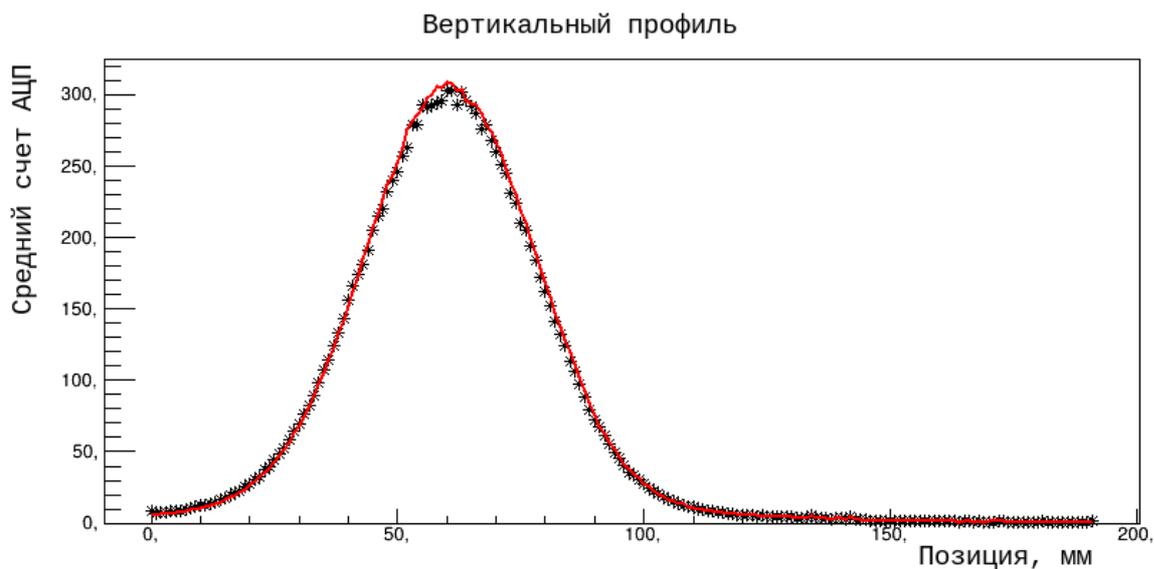


Рис. 6. Вертикальный профиль со 192 стрипов. Красный цвет (линия) — после выравнивания, черный (точки) — до выравнивания (цвета в онлайн версии).

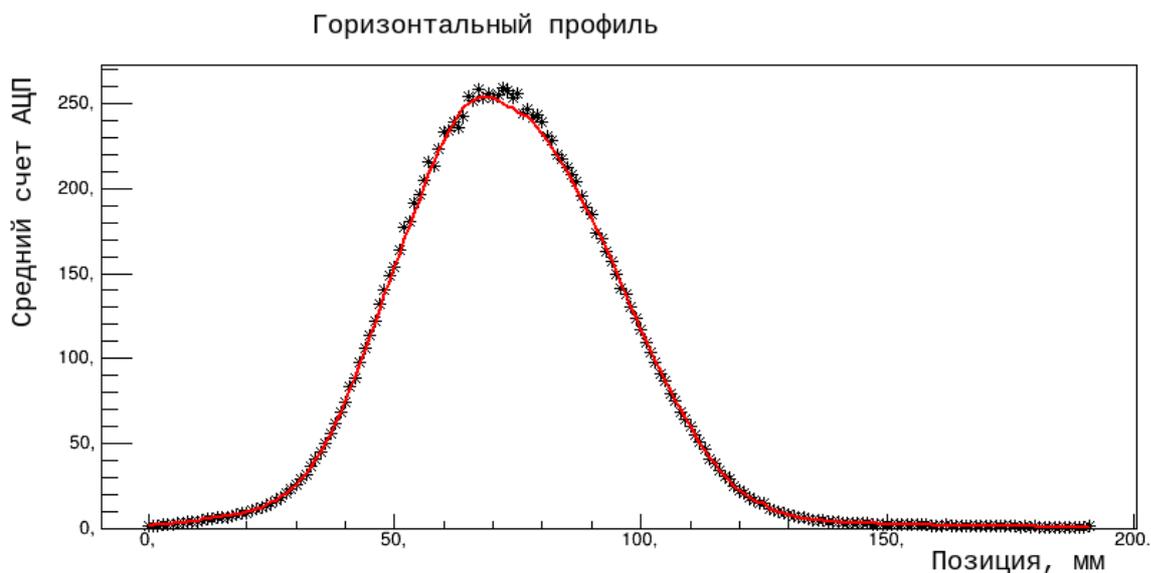


Рис. 7. Горизонтальный профиль со 192 стрипов. Красный цвет (линия) — после выравнивания, черный (точки) — до выравнивания (цвета в онлайн версии).

Испытания камеры на пучке ионов углерода

При выводе пучка ионов углерода из ускорительного комплекса У-70 с энергией 450 МэВ/нуклон были выполнены измерения для двух интенсивностей: высокая - $2 \cdot 10^8$ частиц / сброс, низкая - $4 \cdot 10^6$ частиц / сброс. Для работы на пучке использовались две откалиброванные однотипные камеры. Проверялась работоспособность камер на нескольких номиналах интегрирующей емкости, и на разной интенсивности пучка.

При разной интенсивности пучка, для Камеры-2, для оценки отношения сигнал-шум (SNR) было установлено минимальное значение интегрирующей емкости в 3 пФ. Вертикальный профиль пучка для большой и малой интенсивностей показан на рисунках 8 и 9.

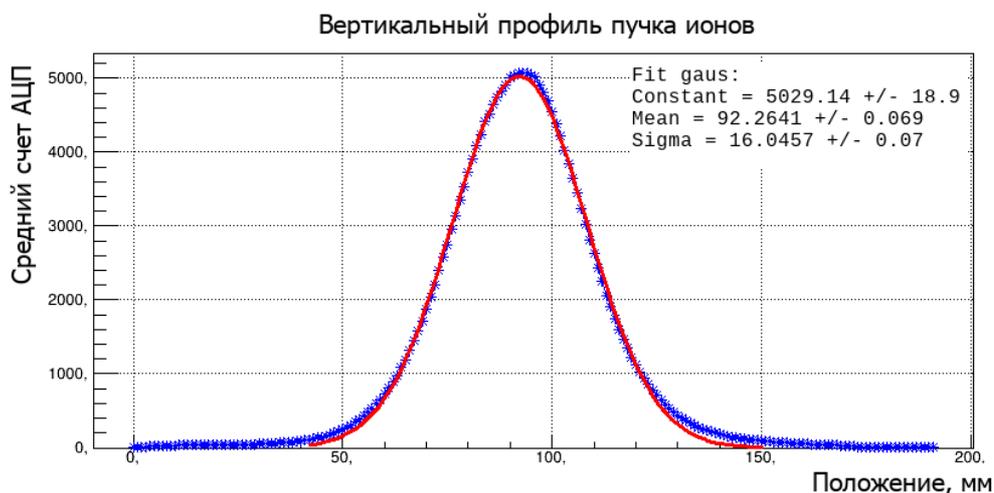


Рис. 8. Вертикальный профиль пучка Камеры-2 при интенсивности $2.5 \cdot 10^8$. Средний счет АЦП за время вывода пучка. Красный цвет (линия) — фит распределением Гаусса, синий (точки) — счет АЦП $S'_{кан}$ по формуле 3 (цвета в онлайн версии).

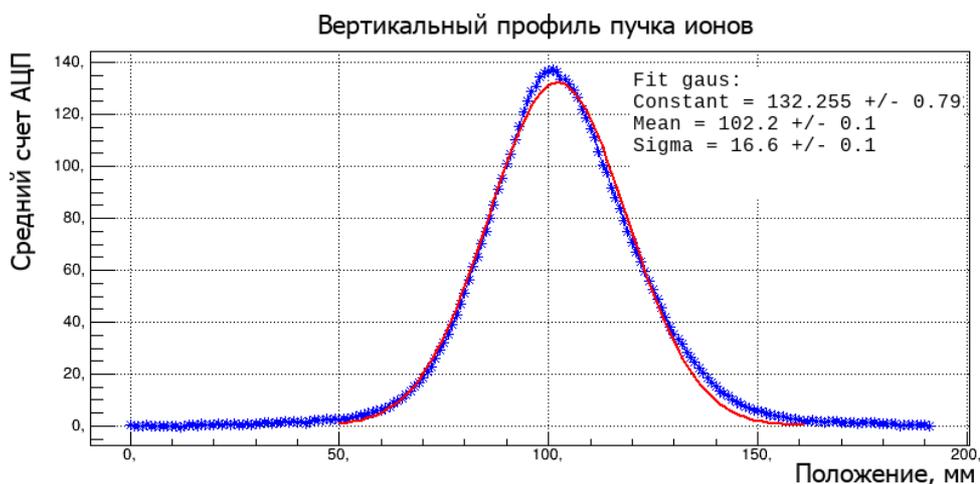


Рис. 9. Вертикальный профиль пучка Камеры-2 при интенсивности $5 \cdot 10^6$. Средний счет АЦП за время вывода пучка. Красный цвет (линия) — фит распределением Гаусса, синий (точки) — счет АЦП $S'_{кан}$ по формуле 3 (цвета в онлайн версии).

Для вертикального профиля, отношение сигнал-шум (4) показано на рисунках 10 и 11.

$$SNR_{кан} = \frac{S'_{кан}}{\sigma(P_{кан})}, \quad (4)$$

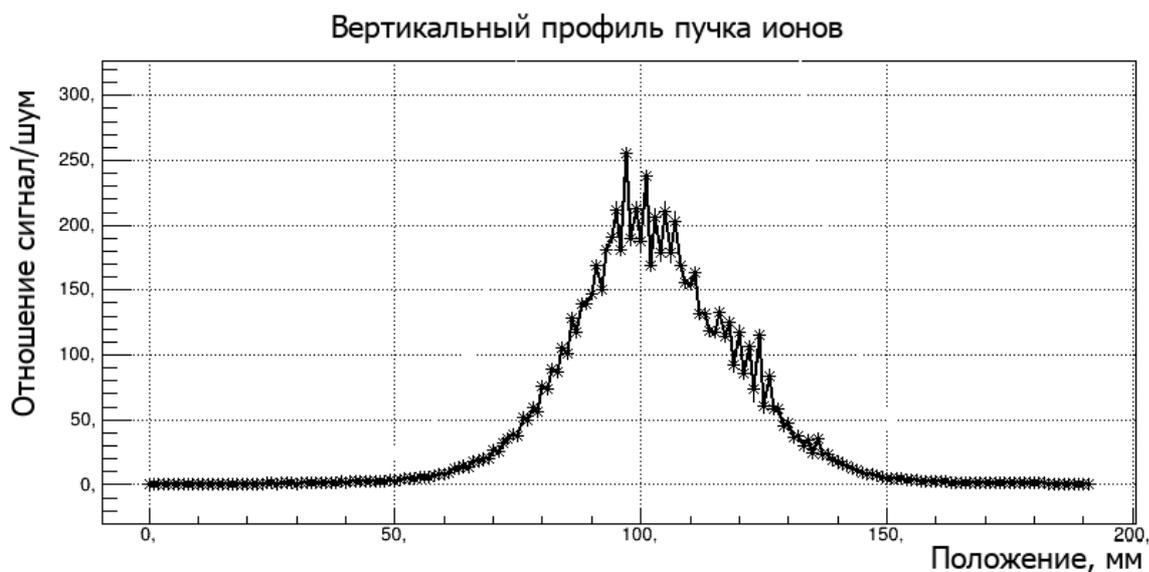


Рис. 10. Отношение сигнал-шум для вертикального профиля Камеры-2, интенсивность $2.5 \cdot 10^8$.

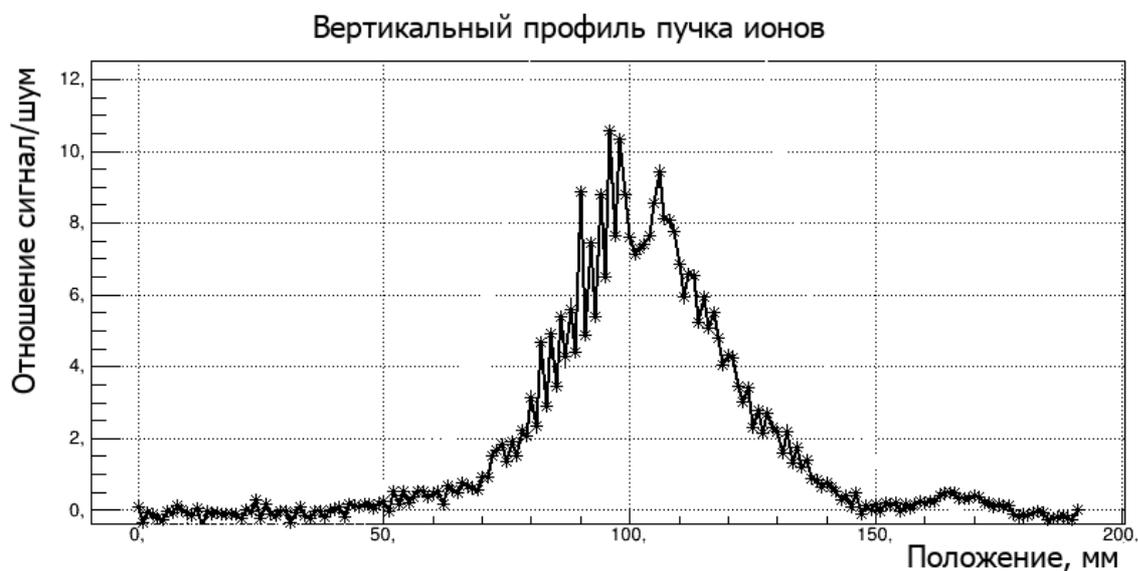


Рис. 11. Отношение сигнал-шум для вертикального профиля Камеры-2, интенсивность $5 \cdot 10^6$.

Для интенсивности $2.5 \cdot 10^8$ значение $SNR > 10$ перекрывает значение ширины профиля пучка на полувысоте (FWHM). При снижении интенсивности до $5 \cdot 10^6$ значение SNR составляет от 4 до 10 для интенсивности пучка внутри его ширины на полувысоте.

Для оценки собираемого заряда с камер был произведен набор данных разной интенсивности в диапазоне от $3 \cdot 10^6$ до $2.13 \cdot 10^8$ частиц за сброс, при емкости интегрирования 37.5 пФ и времени интегрирования одного измерения в 4 мс для Камеры-1, и емкости интегрирования 3 пФ и времени интегрирования одного измерения в 8 мс для Камеры-2. Монитор интенсивности был установлен в голове канала вывода.



Рис. 12. Зависимость суммарного заряда в профилях от интенсивности для Камеры-1.

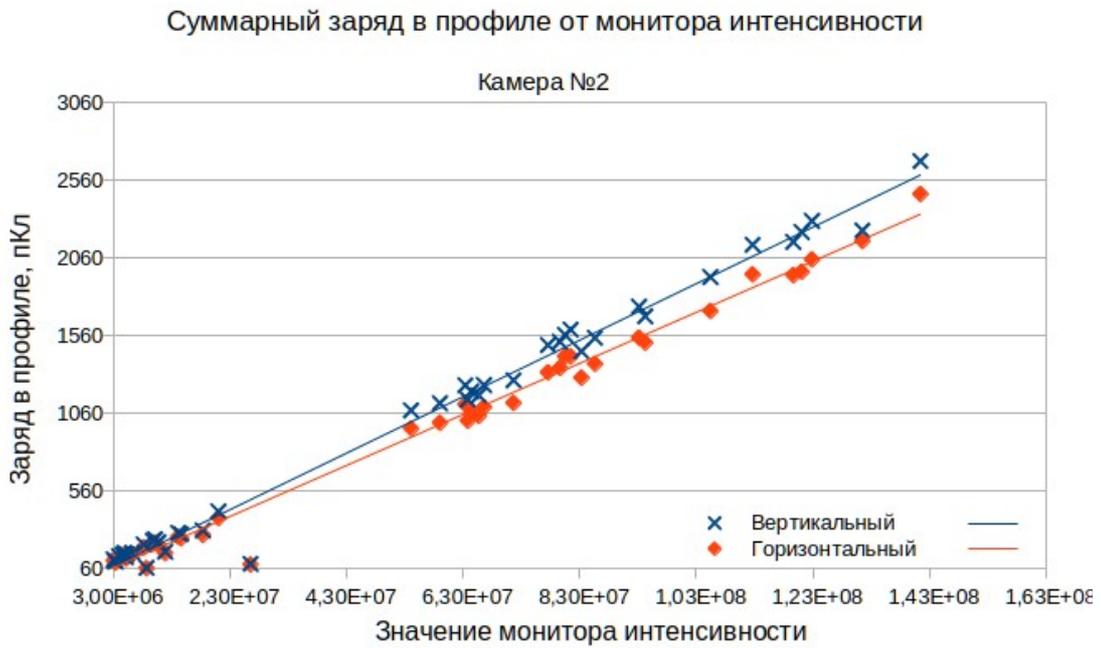


Рис. 13. Зависимость суммарного заряда в профилях от интенсивности для Камеры-2.

Линейность зависимости собираемого заряда ионизационными камерами от внешнего счетчика интенсивности (монитора интенсивности пучка) показывает возможность работы камер без изменения режима системы сбора данных (время интегрирования и интегрирующая емкость) при разной интенсивности вывода.

Т.к. профиль пучка по горизонтали и по вертикали являются независимыми измерениями интенсивности пучка с распределениями $P(x)$ и $P(y)$ соответственно, то для двумерного представления данных интенсивности можно сформировать матрицу $P(x,y) \sim P(x) * P(y)$, количество строк в которой равно числу стрипов в вертикальном профиле, а количество столбцов — числу стрипов в горизонтальном профиле, значения элементов матрицы — значения P_{xy} для соответствующих индексов стрипов в профилях. Пример «псевдо» двумерного распределения суммарной амплитуды за время одного вывода для Камеры-1 показан на рисунке 14.

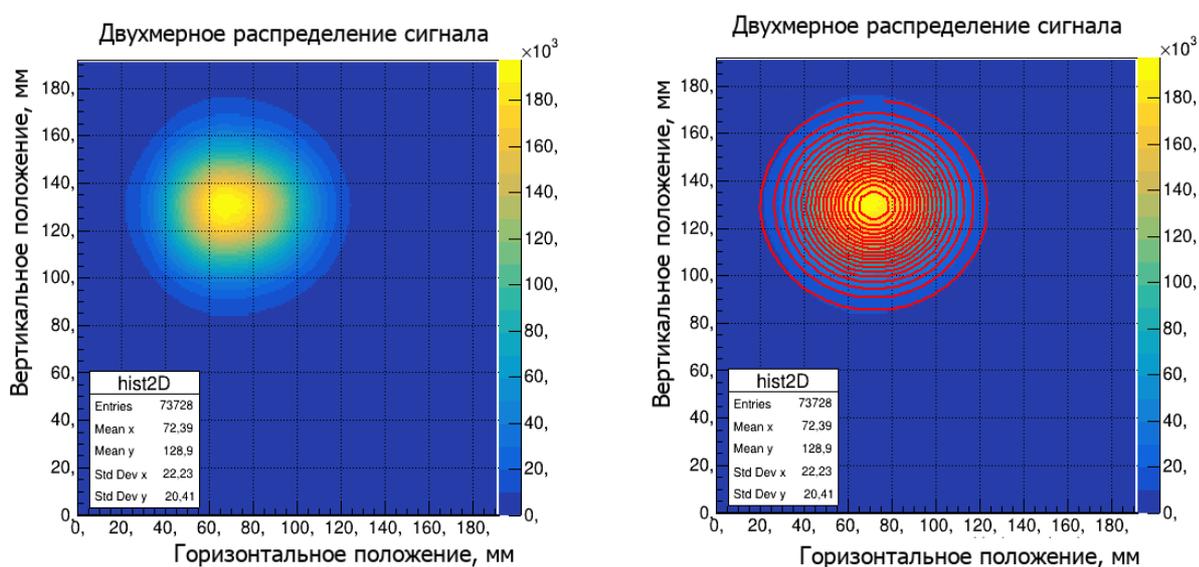


Рис. 14. Двухмерное распределение амплитуды для пучка с интенсивность $2.13 \cdot 10^8$ частиц за время вывода в 900 мс. Слева — исходное распределение, справа — фит hugaus в ROOT6. Результат фита: Constant = $1,98924e+05$, MeanX = 71.98 мм, SigmaX = 21.14 мм, MeanY = 129.6 мм, SigmaY = 18.1 мм.

Заключение

В рамках выполнения распоряжение Правительства №263-р от 06.02.2023г (об утверждении Программы деятельности федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» на 2023-

2027 г.г.) была разработана технология и изготовлены образцы двухкоординатной полосковой камеры для измерения пространственного положения пучка, используемого для формирования дозового объёма пучком ионов углерода.

Представлена геометрия и характеристики плоскопараллельной ионизационной камеры, описана система сбора данных, а также процедуры калибровки счетной функции АЦП (проверка линейности счета) и выравнивания чувствительности детектирующих элементов.

Блок управления камеры позволяет производить измерения с временным интервалом 2-32 мсек, что даёт возможность регистрировать временную структуру сброса пучка. Две камеры были протестированы на пучке углерода и показали свою работоспособность. Камеры показали линейную зависимость суммарного заряда в профиле от интенсивности в диапазоне от $3 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^8$ частиц за вывод.

Для интенсивности пучка $2 \cdot 10^8$ соотношение сигнал-шум для камер больше 10, а для интенсивности $3 \cdot 10^6$ соотношение сигнал-шум больше 4.

К особенностям эксплуатации камер, нужно отнести тот момент, что их необходимо предварительно калибровать для каждого используемого номинала интегрирующей емкости и выравнивать амплитудную чувствительность каналов.

Список литературы

- [1] Ю.М. Антипов, А.П. Солдатов, СОЗДАНИЕ ЦЕНТРА ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ, Журнал Медицинская физика, 2016, №2 (70), с. 5-9.
- [2] Ю.М. Антипов, А.Г. Васильева и др., Статус экспериментальной установки Радиобиологический стенд (РБС) на выведенном пучке ядер углерода из ускорительного комплекса У-70, в сборнике Докладов международной конференции, РУПАК – 2023, Новосибирск, сентябрь 2023.
- [3] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/835490/TI1/DDC232.html>

Рукопись поступила 12 февраля 2026 г

Горохов С.А. и др.

Плоскопараллельная двухкоординатная ионизационная камера.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 11.02.2026 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1, 25. Уч.- изд.л. 1, 73. Тираж 68. Заказ 11. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл.Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

